

ヒト指紋形状の力学的意味

前野 隆司^{*1}, 山田 大介^{*2}, 佐藤 英成^{*3}

Analysis on Geometry of Human Epidermal Ridges

Takashi MAENO, Daisuke YAMADA and Hidenari SATO
Department of Mechanical Engineering, Keio University
Hiyoshi, Kohhoku-ku, Yokohama 223-8522

Purpose of epidermal ridges of humans have been said to avoid slippage and to increase sensitivity of tactile perception. In the present study, meaning of detailed geometry of each epidermal ridge is investigated. First, cross-sectional geometry of epidermal ridges are measured using imprint material. It is found that the geometry of epidermal ridges are between that of arc and trapezoid. Then, finite element contact analyses between finger section model and a flat plate are conducted. It is found that normal contact force distribution of human epidermal ridge is much uniform compared with those for arc and trapezoid. It is also found that rapid entire slippage of an epidermal ridge occurs when tangential traction is applied. Finally, eigen value analysis is conducted. It is found that eigen frequency of the epidermal ridges agrees with FA I mechanoreceptor's sensitive frequency.

Key Words: Epidermal ridge, finger of human, Tactile sensation, Stick and slip, Finite element method, Contact analysis

1. はじめに

指紋を有する霊長類の指腹部は、前腕部、腹部、額などの皮膚と比較して高摩擦を示すことが知られている⁽¹⁾⁽²⁾。これは、指紋の凹凸と発汗作用に起因しており、指紋は滑り止めの役割を果たしているものと言われている⁽³⁾⁽⁴⁾。また、筆者らは、指紋の起伏により、指紋直下に規則正しく 2 列に配置されたマイスナー小体の感度が向上することを明らかにした⁽⁵⁾。指紋は、ヒトが行う器用な物体の把持や高度なハンドリングに深く関わっていると言える。しかし、個々の指紋の詳細形状の意味は十分に明らかにされていない。

このため、本研究では、指紋の詳細形状の力学的な意味を明らかにすることを目的とする。まず、指紋の断面形状を測定する。次に、指紋部を詳細に要素分割した指の有限要素モデルを構築する。最後に、本モデルを用いた接触解析および固有振動数・固有モード解析により、指紋は局所的な滑り情報を生成・検出しや

すい形状になっていることを示す。

2. 指紋の形状計測

2-1 測定方法 歯科において歯の型取りに用いられる 3M ESPE 社製のインプリント材（シリコーン印象材インプリント II）を用いて指紋の型を採取した。本素材は 2 種混合材であり、鮮明な精密型を生成することが可能である。また、硬化後の寸法変化が 0.9%未満であり、長期にわたる寸法安定性にも優れている。本インプリント材を用いて金属性表面粗さ試験片の型取りを行い、形状再現性の試験を行なった結果、誤差は 1 μ m 以下であった。以上より、本インプリント材はヒト指紋の型を取るために十分な精度を有することを確認できた。

ヒト指紋の型の作製は、以下の 2 段階に分けて行った。まず、混合したインプリント材を指紋の溝部へ深く侵入させるために、ヒトの指腹部表面に薄く塗り、硬化させた。つぎに、金属型上でインプリント材を新たに混合し、そこへ指を押し付けて型を作成した。次に、型表面の指紋部を黒く着色したインプリント材で埋め、硬化させた。最後に、末節骨と直行する面が断面となるように、インプリント材の指腹部中央付近を切断し、切断面を顕微鏡により撮影した。

原稿受付 平成 16 年 4 月 16 日

^{*1} 正員, 慶応義塾大学理工学部(〒223-8522 横浜市港北区日吉 3-14-1)

^{*2} 正員, 榊豊田中央研究所

^{*3} 慶応義塾大学大学院理工学研究科

E-mail: maeno@mech.keio.ac.jp



Fig. 1 Cross-sectional picture of finger mold

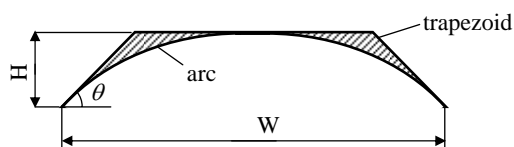


Fig. 2 Arc and trapezoid for defining geometry of an epidermal ridge

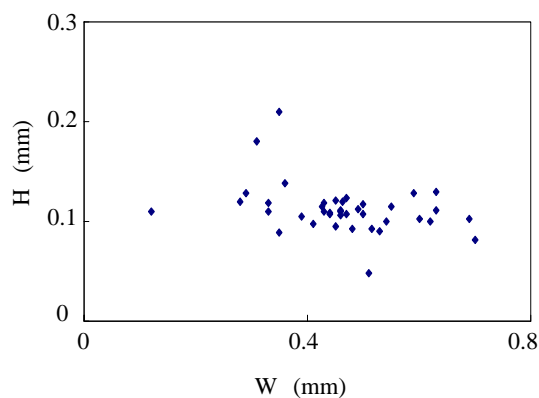


Fig. 3 Relationship between width W and height H of epidermal ridges

得られた指紋画像の一例を図 1 に示す。得られた画像において、指紋の外形をドット単位で座標化し、それらを線で結ぶことによって指紋形状を求めた。

2.2 測定結果 被験者 1 名の左右 10 指の指紋形状を測定したところ、すべての指紋形状は、図 2 に示す台形と円弧の間の斜線部に収まることがわかった。図 2 に示すように、指紋の底辺と高さをそれぞれ W 、 H と定義する。次に、成人男女それぞれ 10 名、合計 20 名を対象に、示指の指紋形状を測定し、1 人あたり左右 2 個、合計 40 個の指紋形状データを得た。得られた W と H の分布を図 3 に示す。 W 、 H の平均値 (±標準偏差) は、 $W=0.46 \pm 0.15\text{mm}$ 、 $H=0.11 \pm 0.027\text{mm}$ であった。

2.3 平均的な指紋形状の算出 計測した 40 個の指紋を、それぞれの指紋における H の最大値 H_0 と W で正規化した後に W 方向に 10 分割し、それぞれの位置における H/H_0 の平均値を求めることにより、平均的な

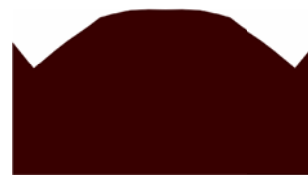


Fig. 4 Outline of average geometry of epidermal ridge

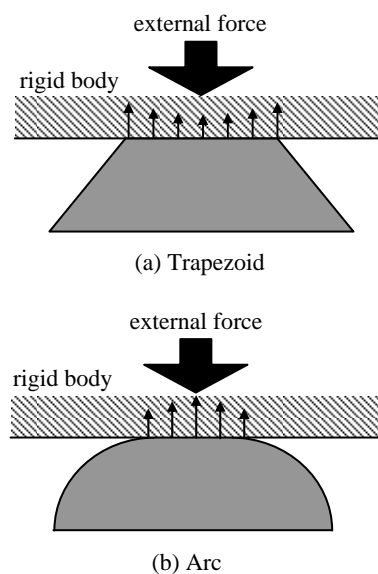


Fig. 5 Distribution of normal force of trapezoid and arc in contact with a flat surface

指紋形状を算出した。結果を図 4 に示す。図 2 に示した台形と円弧の中間的な形状となっていることがわかる。

3. 指腹部の有限要素解析

3.1 仮説 ヒトの指紋形状が台形と円弧の中間的な形状である理由を明らかにするために、図 5 に示す 2 つの弾性体に剛体平面を接触させた際の法線反力分布を考える。接触面における法線反力は、弾性体形状が台形の場合(a)には、接触面の中央部で小さく端部で大きい凹の分布を、円弧の場合(b)には、接触面の中央部で大きく端部で小さい凸状の分布の示すと考えられる。なお、この傾向は法線反力の大きさに依存しない。このため、台形と円弧の中間的な形状であるヒト指紋の場合には、接触面における法線反力は、両者よりも均一に近い分布を呈すると予測できる。

次に、物体と接触する指紋に接線方向の摩擦力が加わった場合の固着・滑り現象⁽⁶⁾について考察する。接

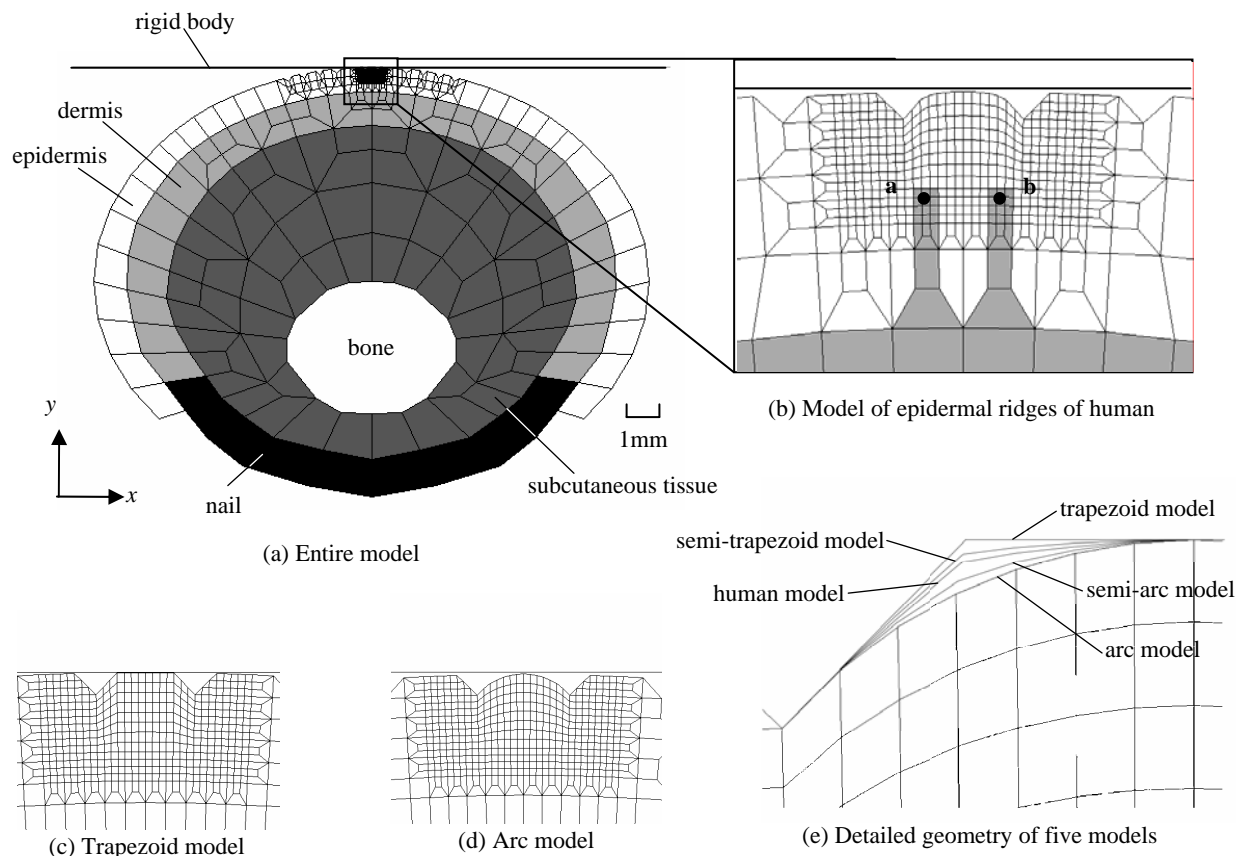


Fig. 6 Finite element model of finger section

触面において法線反力が不均一分布している場合、摩擦力を加えると、法線反力の小さい点から順に滑りが生じる。一方、法線反力が均一分布している場合には、1つの指紋内では局所的な滑りが生じず、指紋全体が同時に滑ることが予想される。指紋全体の均一な滑りは、指紋直下に配置されたマウスナー小体などの触覚受容器により、精度良く検出できると考えられる⁽⁶⁾。

また、指紋の固有振動数が、マウスナー小体などの触覚受容器の感度最大周波数と一致しているならば、指紋全体のステップ状の滑りを応答性良く検出するために有効である。このため、指紋の固有振動数と触覚受容器の感度最大周波数には関係があることが予想される。

3・2 モデル 上述の仮説を検証するために、2章で求めた平均的な指紋形状と、小林らが行ったヒト指の測定結果⁽⁵⁾を元に、ヒト指断面を詳細に再現した2次元有限要素モデルを作成した。モデルを図6(a)に示す。指紋が存在する指腹部は、図の面外方向を長手方向とする楕円柱とみなし、平面ひずみ要素を用いてモデル化した。また、指部腹部中央の指紋1つに着目することとし、この部位の要素を図6(b)のように細かく分割した。なお、指紋の幅と高さは、2章の結果より、

$W=0.46\text{mm}$, $H=0.11\text{mm}$ とした。以後、細かく要素分割した中央部の指紋を指紋Aと呼ぶ。指紋Aの直下には真皮乳頭の形状を作成した。先端のマウスナー小体位置の節点を節点a, bと呼ぶ。

また、指紋Aの外形形状を変えたモデルをいくつか作成した。ヒトの平均的な指紋形状のモデルをhuman modelと呼ぶ。また、2章で述べたように指紋形状の範囲はおおよそ台形と円弧の間にあるため、指紋Aの形状が台形および円弧のモデルを作成し、それぞれtrapezoid model, arc modelと呼ぶこととする。さらに、これらとhuman modelの中間のモデルを作成し、それぞれsemi-trapezoid model, semi-arc modelと呼ぶこととする。なお、底面と側面のなす角度は、すべてhuman modelと同じにした。作成したモデルを図6(c), (d), (e)に示す。

表皮、真皮、皮下組織、爪に相当する要素の縦弾性係数は、小林らの測定結果⁽⁵⁾を用いた。すなわち、それぞれ、 0.136MPa , 0.08MPa , 0.34MPa , 142.1MPa とした。ポアソン比はいずれも0.48とした。

3・3 法線反力分布 本モデルに対し、有限要素法コードMARCを用いた解析を行った。まず、末節骨表面にあたる節点を拘束し、剛体平板を指に押し付け

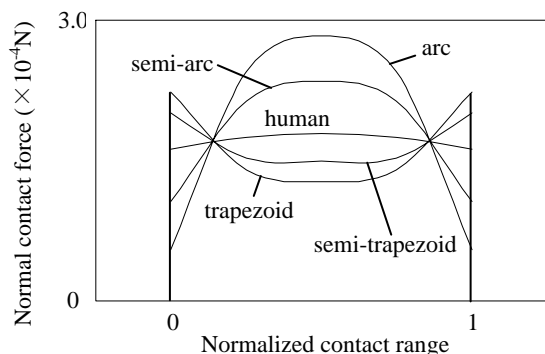


Fig. 7 Distribution of normal contact force
(Normal load = 0.7 N)

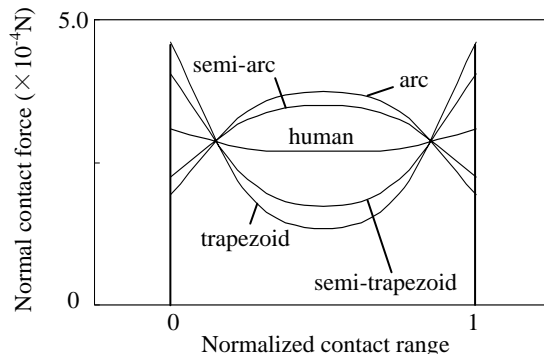


Fig. 8 Distribution of normal contact force
(Normal load = 0.9 N)

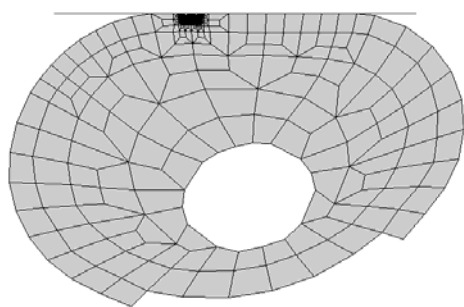


Fig. 9 View of human finger model in STEP 200

た場合の解析を行った。本研究ではクーロン摩擦を仮定し、静止摩擦係数と動摩擦係数はともに 1.0 とした。

垂直荷重（法線反力の合計）が 0.7N の際の節点反力分布を図 7 に示す。また、垂直荷重が 0.9N の場合の結果を図 8 に示す。これらの値は、鉛筆を把持するなどの日常的な精密把握時に加わるオーダーの反力である。モデルによって接触範囲が異なるため、接触幅の左端が 0、右端が 1 となるように正規化した。その結果、human model は均一に近い分布を、arc model は中央部の値が大きい凸の分布を、trapezoid model は端部の値が大きい凹の分布を示すことがわかった。また、semi-trapezoid model はやや凹の分布を、semi-arc model はやや凸の分布を示した。

これらの結果より、3・1 で予測したように、ヒトの指紋形状は、与えた垂直荷重範囲では、接触面における法線反力が均一に近い分布を呈するような形状であるといえる。もちろん、法線反力が変われば、ヒトの指紋形状のときに反力が不均一分布するのではあるが、少なくとも円弧状や台形状の場合よりも均一に近い分布となることは明らかである。また、ヒト指腹部は全体として曲率を持っているため、指が剛体平板と少なくとも 0.7N 以上の力で接触する際には、接触端部付近において、必ず、反力が均一に近い分布を示す指紋

があるといえる。対象物体が平板でなく、なだらかな曲率を持つ場合も同様である。以上より、指紋は、垂直荷重（法線反力の合計）がある範囲内にあるときに、反力が均一分布するような形状となっているといえる。

3・4 固着・滑り状態 3・1 節で述べたように、ある指紋における法線反力が均一分布している場合には、その指紋内では局所的な滑りが生じにくく、その指紋全体が同時に滑りやすいことを確認するために、剛体平板を指に押し込んだ後に接線方向に移動させる解析を行った。本解析は、指全体が固着している初期状態から、接触端部付近の指紋が滑るまでの、過渡状態の解析に相当する。接触解析においては、接触面内の固着・滑り状態を考慮した。なお、前節で述べたように、指と物体の接触時に初期局所滑りが生じる場所は接触端部である。このため、細かく要素分割された指紋 A が接触端部に位置するように、対象物を斜めに接触させた。すなわち、3・1 節で述べたそれぞれのモデルを左回りに 15° 回転させた後に、剛体平面を法線方向に 1.5mm 押し込んでから、接線方向に 1.5mm 移動させた。全体を 1 秒とし、全体を 200 STEP に分割する動解析を行った。剛体平面を法線方向に 1.5mm 押し込んだときの垂直荷重は約 0.7N であった。1 秒後における変形の様子を図 9 に示す。

それぞれのモデルにおいて、指紋 A 表面における物体と接触する節点の x 方向速度を求め、これが接触対象物の x 方向速度と等しい時は固着、等しくない時は滑りと定義した。また、接触面の固着率を、

$$(\text{固着率}) = (\text{固着節点数}) / (\text{接触節点数}) \quad (1)$$

と定義した。なお、剛体平板を接線方向に移動させる際の垂直荷重はほぼ一定であったため、接触節点数はほとんど変化しなかった。

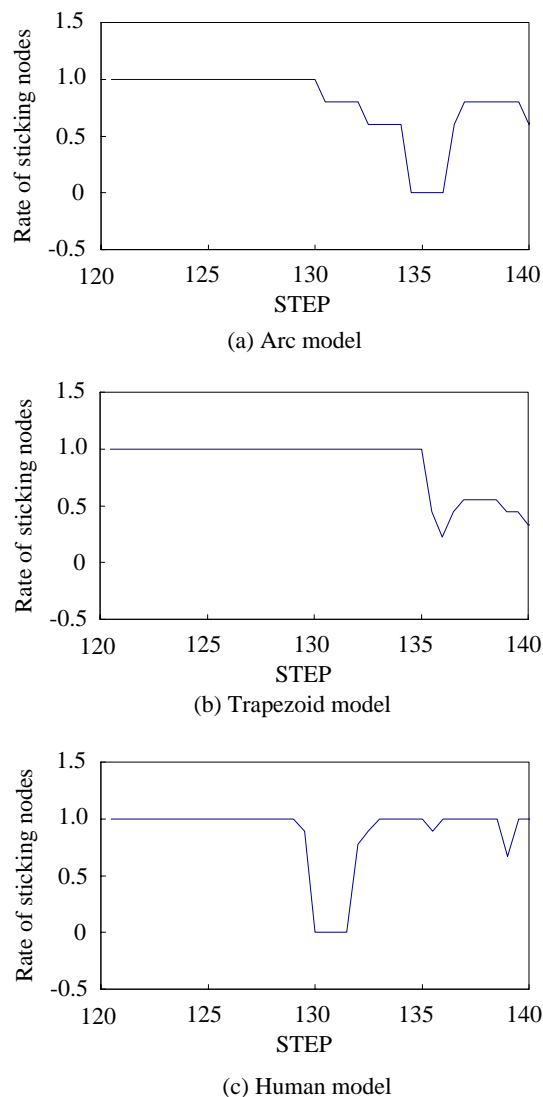


Fig. 10 Rate of sticking nodes when the finger is moved in tangential direction

arc model, human model, trapezoid model の固着率の履歴を図 10 (a)~(c)に示す。

図 10 (a)より, arc model では STEP 130 から 135 にかけて接触状態が固着から滑りへとゆるやかに移行することがわかる。この際, 最初に滑りを起こした節点は, 接触面端部の節点であった。arc model では, 法線反力が中央部で大きく端部で小さい分布を呈するため, 法線反力が小さい接触面端部において局所滑りが生じ, これが次第に広がって最終的に指紋中央部にまで広がることにより, 固着から滑りへとゆるやかに移行している。

図 10 (b)よりわかるように, trapezoid model では, STEP 135 付近で急激に固着率が低下したものの, その値は 0 に達しなかった。trapezoid model では, 接触

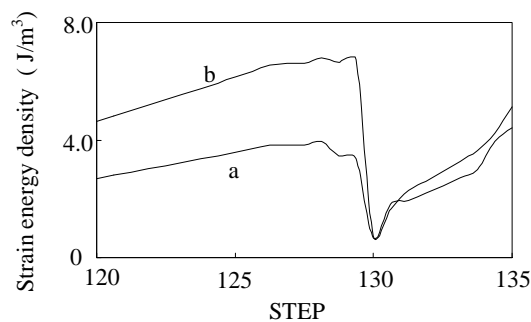


Fig. 11 History of strain energy density when the finger is moved in tangential direction

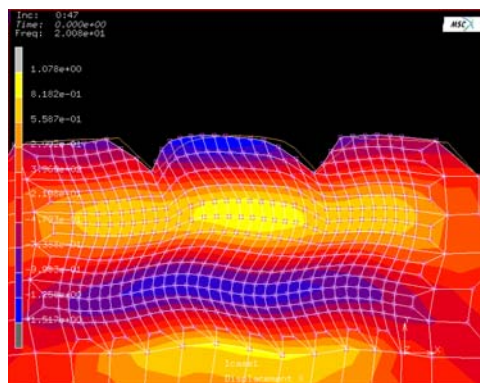


Fig. 12 Natural mode of human finger tissue

面中央部において常に微小な滑りが生じており, 両端部はそれぞれ固着と滑りを繰り返していた。すなわち, 常にいずれかの端部節点が固着するようなスティック・スリップ振動が繰り返されていたため, 固着率は常に 0 より大きかった。

図 10 (c)より, human model では, STEP 130 付近でひとつの指紋全体が固着から滑りへと急激に変化していることがわかる。human model においては, 接触面の法線反力が均一に分布しているため, 接触している全ての節点が同時に滑り, 指紋に蓄積されていたせん断変形が同時かつ急激に開放されている。

3.5 マイスナー小体の発火状態 図 6 (b)における節点 a, b にはマイスナー小体が存在する。マイスナー小体の発火頻度は, 有限要素法により計算されたひずみエネルギーと相関がある⁽⁷⁾。このため, 前節の human model の解析結果におけるひずみエネルギーの変化を求めた。結果を図 11 に示す。図 11 より, マイスナー小体位置のひずみエネルギーは STEP 130 で急激に減少することがわかる。この時刻は, 図 10 (c)で示した, 指紋全体が同時に滑る時刻と一致している。マイスナー小体は刺激の変化速度に比例したインパル

ス発射を呈する受容器であるため、このようにひずみエネルギーが急激に変化する状態の検出に適している。これより、指紋形状は、一様な滑り状態を生成することにより、触覚受容器で検出しやすい情報を生成するような形状になっているといえる。なお、本結果は、人工の指紋とマイスナー小体を作成した筆者らの研究結果⁽⁶⁾とも定性的に一致している。

3-6 固有振動数・固有モード human model に対し、固有振動数・固有モード解析を行い、指紋が接線方向に対しせん断変形する固有モードを探索した。ただし、末節骨表面にあたる節点を拘束し、指紋表面は自由端とした。簡単のため、減衰は 0 とした。その結果、固有振動数が約 20Hz の振動の固有振動モードが図 12 のようなモードシェープを呈した。濃淡は水平方向変位を表す。これより、ある時刻に指紋全体が固着から滑りへとステップ状に振動する際には、この固有振動モードのような皮膚変形が生じることが示唆される。マイスナー小体は、振動検出の振幅閾値が数 10Hz で最高感度に達することが知られており⁽⁸⁾⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾、指紋の固有振動数とよく一致している。マイスナー小体の最高感度周波数が指紋の固有振動数と一致する理由は明らかではないが、少なくとも、指紋の形状は、マイスナー小体が動的に発火しやすいような形状であると言える。

4. おわりに

ヒトの指紋形状に着目し、指紋形状計測および有限要素法による接触解析・振動解析を行い、以下の知見を得た。

- (1) 指紋の断面形状を測定した結果、台形と円弧の中間的な形状となっていることがわかった。
- (2) 指紋形状に基づき指紋断面を詳細にモデル化し、有限要素法を用いて平板を押し付ける解析を行った結果、ヒト指紋形状の場合には台形や円弧の場合よりも、垂直荷重がある範囲内にあるときに法線反力が均一に近い分布を呈することがわかった。
- (3) 有限要素法を用いて平板を押し付けた後に接線方向にずらす解析を行った結果、ヒト指紋形状の場合には、台形や円弧の場合よりも、指紋全体が瞬

時に滑りやすいことがわかった。

- (4) ヒト指腹部モデルに対し固有振動数・固有モード解析を行ったところ、固有振動数約 20Hz のせん断変形モードが存在することがわかった。この周波数はマイスナー小体が感度良く発火する周波数とよく一致していた。
- (5) 以上より、ヒト指紋の詳細形状は、静的にも動的にも指紋の滑りを生成・検出しやすいような構造になっているといえる。

謝辞 本研究の一部は、文部科学省平成 15 年度 21 世紀 COE プログラム「知能化から生命化へのシステムデザイン」によるものであることを記し、謝意を表す。

参考文献

- (1) 笹田, 皮膚の摩擦, 日本臨床バイオメカトロニクス学会誌, **18**, (1997), pp. 555-560.
- (2) 嶋田, 韓, 川村, 人間の手指の摩擦特性の解析, 計測自動制御学会論文集, **32-12**, (1996), pp. 1581-1587.
- (3) O. S. Disc, C. M. Ettles, S. J. Calabrese and H. A. Scarton, Some parameters affecting tactile friction, Trans. ASME, J. Tribology, **113**, (1991), pp. 512-517.
- (4) 笹田, 井上, 手指の摩擦異方性に対する指紋の役割, 日本トライボロジー学会トライボロジー会議予稿集, **23**, (2001), pp. 391-392.
- (5) 小林, 前野, ヒト指腹部構造と触覚受容器位置の力学的関係, 機論, **63-667, C** (1997), pp. 881-888.
- (6) 山田, 前野, 山田, 指紋により接触/非接触・固着/滑り分布を検出する弾性ロボットフィンガの開発, 機論, **70-690, C** (2004), pp. 560-566.
- (7) 小林, 前野, ヒト指腹部構造と触覚受容器位置の力学的関係 (第二報, 動的接触解析手法および移動する平面と指の動的接触解析結果), 機論 **64-628, C**, (1998), pp. 4798-4805.
- (8) A. W. Freeman and K. O. Johanson, A Model Accounting for Effects of Vibratory Amplitude on Responses of Cutaneous Mechanoreceptors in Macaque Monkey, J. Physiol, **323**, (1982), pp. 43-64.
- (9) 前野, ヒト指腹部と触覚受容器の構造と機能, 日本ロボット学会誌, **18-6**, (2000), pp. 772-775.
- (10) 篠田, 皮膚の力学的構造に隠れている知能, システム/制御/情報, **46-1**, (2002), pp. 28-34.